

doi: 10.7690/bgzdh.2019.02.017

## EFP/预制破片复合战斗部结构设计与分析

郭美红, 张庆, 李文彬, 董晓亮

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

**摘要:** 为增大毁伤面积并提高侵彻能力, 设计不同结构的爆炸成型弹丸 (explosively formed penetrator, EFP)/预制破片复合战斗部, 综合挡环结构及预制破片钨球的排布方式, 得到 4 种方案。应用 ANSYS/LS-DYNA 对战斗部成型过程进行数值模拟, 通过不同战斗部结构方案分析, 研究挡环结构及预控破片排布方式对毁伤元成型过程和毁伤效果的影响。结果表明: 当挡环顶部与药型罩底部处于同一平面时, 形成的 EFP 速度更高、长径比更大、长度更长, 且内圈钨球的轴向速度更高; 采用内圈钨球 26 枚、外圈钨球 32 枚的钨球排布方式的战斗部, 其内、外圈钨球发散角更大, 能形成具有良好侵彻能力且密度均匀的破片场, 仿真与实验结果一致。

**关键词:** 爆炸力学; 预制破片; 药型罩; EFP

**中图分类号:** TJ410.3 **文献标志码:** A

## Structural Design and Its Analysis of EFP/Prefabricated Fragment Composite Warhead

Guo Meihong, Zhang Qing, Li Wenbin, Dong Xiaoliang

*(National Key Laboratory of Fundamental Science on Smart Ammunition Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)*

**Abstract:** In order to enlarge the damage area and improve the penetration ability of EFP/prefabricate fragment warhead, different structures are designed. There are 4 schemes of baffle ring structures and prefabricated fragment arrangement modes. The formation processes are simulated by ANSYS/LS-DYNA to study the influences of baffle ring structures and prefabricated fragment arrangement modes on the kill element forming process and the damage effectiveness. Result shows that, when the top of the baffle ring and the bottom of the liner are in the same plane, the warhead can form EFP with a higher velocity, larger diameter ratio, and longer length and the tungsten spheres in inner ring with a higher axial velocity. The warhead with 26 tungsten spheres in inner ring and 32 tungsten spheres in outer ring can form tungsten spheres with a greater divergence angle, and can obtain a fragment field with good penetration performance and uniform fragment density. The simulated results are in good consistent with the experiments.

**Keywords:** explosion mechanics; prefabricated fragment; shaped charge liner; EFP

### 0 引言

随着信息化、网络化作战需求及高新技术的发展, 弹药技术向信息化、智能化、网络化方向迈进<sup>[1]</sup>。复合战斗部 (composite damage warhead) 起爆后对目标同时产生 2 种或以上作用, 可使弹药实现一弹多用, 适时摧毁战场中出现的多种目标, 从而成为目前战斗部发展的一个重要方向<sup>[2]</sup>。爆炸成型弹丸 (EFP) 是打击地面重装甲等点目标的有效手段, 而预制破片群可对面目标进行覆盖式打击<sup>[3-4]</sup>, 爆炸成型弹丸与预制破片结合的复合战斗部技术是完成打击点、面目标的有效方式之一。李刚等<sup>[5]</sup>基于 EFP 战斗部结构, 提出了轴向 EFP 药型罩和周向装填预制破片复合的战斗部结构, 并对比了未装填预制破

片方案与装填预制破片方案, 装填预制破片不影响药型罩成型且形成的预制破片速度与分布较理想; 张俊等<sup>[6]</sup>研究了药型罩壁厚、内衬尺寸以及破片直径对上述类型战斗部的成型与杀伤能力的影响规律; 龚柏林等<sup>[7]</sup>提出了一种将预制破片群与药型罩破片群相结合的复合破片场成型技术, 给出了复合破片战斗部的弹体结构, 对破片场的成型过程进行了数值仿真, 并进行了实验验证。

笔者利用 ANSYS/LS-DYNA 数值仿真软件, 分析 EFP/预制破片复合战斗部的成型过程, 研究了挡环结构和预控破片排布方式对其毁伤元成型过程及毁伤效果的影响, 并得到一种具备良好侵彻能力且破片场密度分布均匀的 EFP/预制破片复合战斗部结构, 可为相关复合战斗部结构设计提供参考。

收稿日期: 2018-11-15; 修回日期: 2018-12-28

作者简介: 郭美红 (1991—), 女, 辽宁人, 满族, 硕士, 从事弹丸的终点效应和目标毁伤、预控破片战斗部、3D 打印技术的应用研究。

### 1 EFP/预制破片复合战斗部结构方案

EFP/预制破片复合毁伤战斗部主要由主装药、药型罩、预制球形破片、挡环、壳体、填充物等构成。壳体采用钢质材料，预制破片材料为钨合金，挡环材料为铝合金，药型罩材料为紫铜，炸药为 8701 炸药。笔者设计了 2 种战斗部装药结构如图 1 所示。结构 1 为挡环外径底部与药型罩底部处于同一平面；结构 2 为挡环内径底部与药型罩底部处于同一平面。

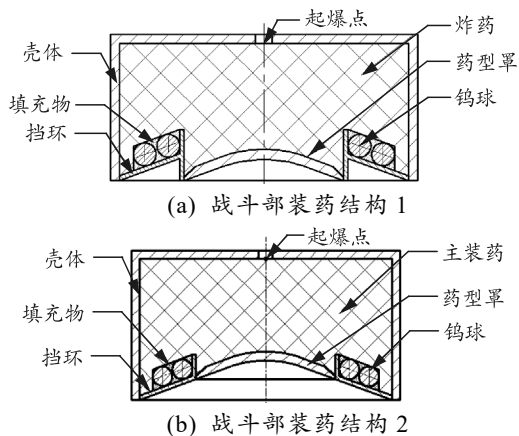


图 1 战斗部装药结构

挡环内部直径为 70 mm，夹角为 140°，壁厚为 2 mm，结构 1 和结构 2 中的挡环结构如图 2 所示。

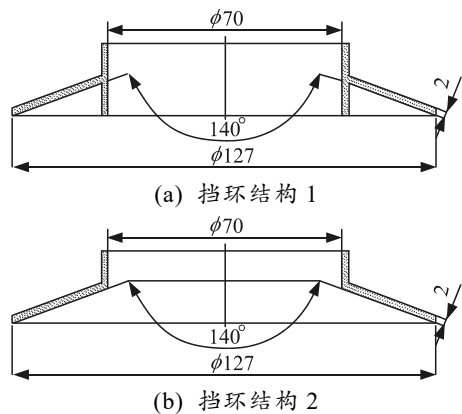


图 2 挡环结构

药型罩采用弧锥结合结构，药型罩口径为 70 mm，壁厚为 4.25 mm，夹角为 140°，弧度半径为 55 mm。如图 3 所示，为了改善药型罩成型形状，对药型罩结构边沿切边，切边厚度为 1.25 mm，切边方向与水平方向为 45°。

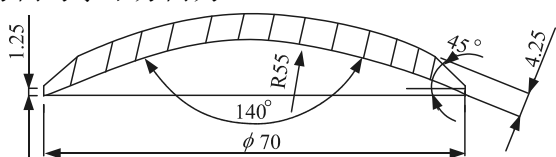


图 3 药型罩

药型罩周围放置的 2 层球形破片，设计了 2 种不同的钨球排布方式如图 4 所示。排布方式 1：内圈钨球为 26 枚，外圈钨球为 32 枚；排布方式 2：内圈钨球为 24 枚，外圈钨球为 32 枚。其中， $R_1$  为内圈钨球球心所在圆半径， $R_2$  为外圈钨球球心所在圆半径。钨球直径为 10 mm。

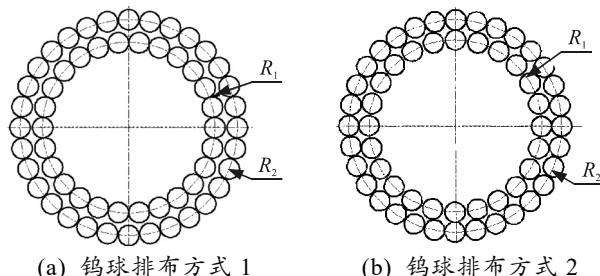


图 4 钨球排布方式(俯视图)

综合挡环结构及预制破片钨球的排布方式，笔者设计了 4 种研究方案：方案 1 采用挡环结构 1 和钨球排布方式 1；方案 2 采用挡环结构 1 和钨球排布方式 2；方案 3 采用挡环结构 2 和钨球排布方式 1；方案 4 采用挡环结构 2 和钨球排布方式 2。

### 2 数值仿真方法及成型过程

#### 2.1 仿真方法与有限元模型

根据战斗部结构参数，利用 LS-DYNA3D 有限元分析软件建立数值仿真模型如图 5 所示。由于复合战斗部的结构具有对称性，因此取 1/2 结构部分建立 3 维模型。考虑毁伤元作用过程具有高温、高压、高应变的特点，计算过程采用 ALE 算法。其中主装药、空气、挡环、填充物为欧拉网格，壳体、药型罩、钨球为拉格朗日网格，并置于欧拉网格中，采用自动面-面接触。由于炸药对钨球及 EFP 成型的有效作用时间有限，为准确快速地进行计算，当计算至 100 μs 时，删除炸药、空气、挡环、填充物等 ALE 单元，利用完全重启继续计算至 400 μs，对 400 μs 时的毁伤元成型参数进行统计<sup>[8-9]</sup>。

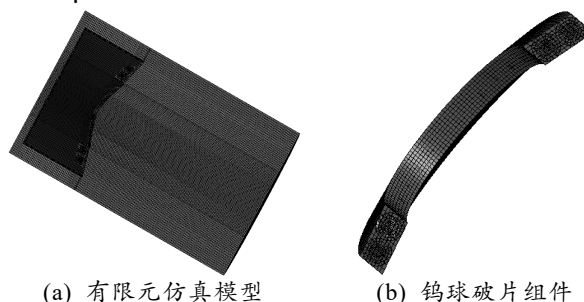


图 5 仿真计算模型

主装药采用高爆模型和 JWL 状态方程描述，药

型罩、壳体均采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程描述, 钨球采用弹塑性材料模型进行描述, 填充物采用空材料模型和 Gruneisen 状态方程描述。计算中材料模型及参数如表 1—4 所示。表中:  $\rho$  为材料密度;  $D$  为爆速;  $p_{cj}$  为 C-J 压

力;  $e_0$  为初始比内能;  $A, B, R_1, R_2, \omega$  为材料参数;  $V_0$  为初始相对体积;  $G$  为剪切模量;  $A', B', N, C, M$  为常数;  $T_m$  为熔化温度;  $\sigma_s$  为失效力;  $C$  为声速;  $S_1, S_2, S_3, \gamma_0, \mu$  为常数;  $E_Y$  为杨氏模量;  $\mu$  为泊松比;  $E_{tan}$  为切线模量。

表 1 主装药材料模型及状态方程参数

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$D/(km \cdot s^{-1})$	$P_{cj}/GPa$	$e_0/GPa$	$A/GPa$	$B/GPa$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$V_0$
1.71	8 425	28.6	8.5	524.2	7.678	4.2	1.1	0.34	1.0

表 2 药型罩、壳体材料模型及状态方程参数

结构	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$G/GPa$	$A'$	$B'$	$N$	$C$	$M$
药型罩	8.96	47.7	0.000 9	0.002 92	0.31	0.025	1.09
壳体	7.83	77.0	0.003 5	0.003 00	0.26	0.014	1.03
结构	$T_m/K$	$\sigma_s/GPa$	$C/(m \cdot s^{-1})$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$\gamma_0$
药型罩	1 360	0.09	3 940	1.49	0.6	0	1.99
壳体	1 760	0.12	3 574	1.92	0	0	2.17

表 3 钨球材料模型及状态方程参数

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$E_Y/GPa$	$\sigma_s/GPa$	$\mu$	$E_{tan} / GPa$
17.6	345	16	0.29	85

表 4 填充物、空气材料模型及状态方程参数

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$C/(m \cdot s^{-1})$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$\gamma_0$
环氧树脂	1.20	2 730	1.493	0	0	1.13
空气	$1.25 \times 10^{-3}$	3 440	0	0	0	1.40

### 2.2 战斗部成型过程

以方案 3 为例, 分析战斗部成型过程。当装药从顶部中心起爆后, 球形爆轰波向药型罩方向运动。药型罩中心加速在前, 罩边缘加速在后, 开始向外翻转形成 EFP 头部; 同时, 爆轰波推动钨球向前并向外运动。随着爆轰波的连续作用, 药型罩

不断发生轴向压垮和变形, 最终形成完整的 EFP; 钨球向轴向运动且获得径向速度, 在不断向径向方向运动的过程中, 内圈与外圈钨球发生碰撞。在  $T=100 \mu s$  后, EFP 完全成型; 内、外圈钨球均获得稳定的径向和轴向速度, 战斗部成型过程如图 6 所示。

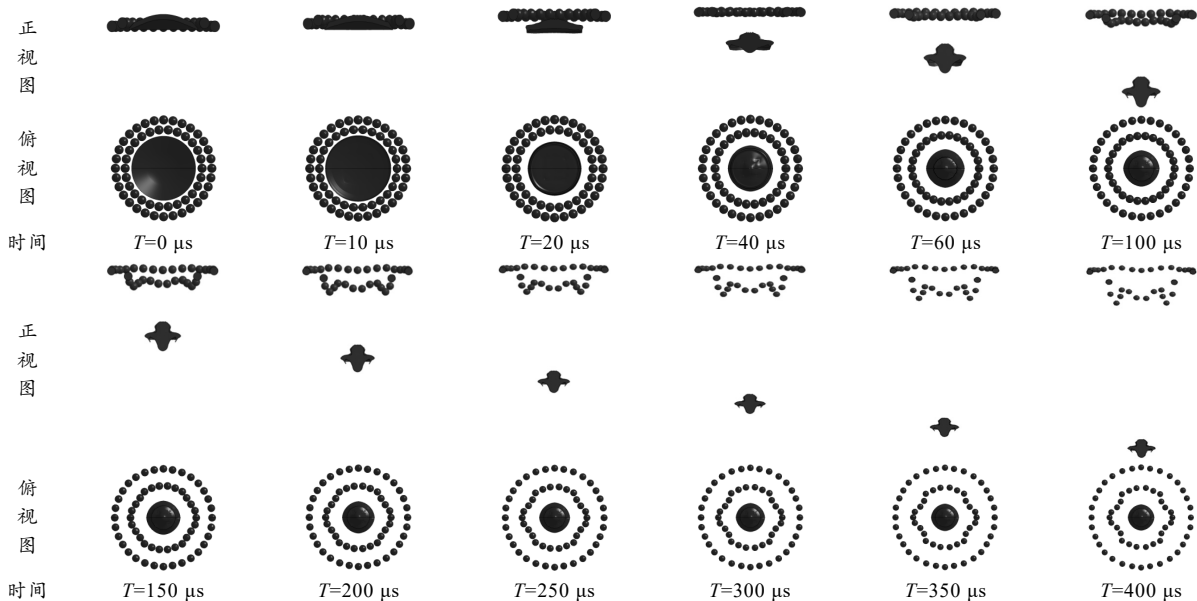


图 6 复合战斗部成型过程

### 3 战斗部结构方案分析

根据对不同战斗部结构方案进行数值仿真计算，得到 400 μs 时不同方案的战斗部成型结果如图 7 所示。

由图可知：不同的挡环结构对 EFP 成型及预制破片的飞散具有重要影响；不同的钨球排布方式对预制破片产生较大影响，而对 EFP 成型影响有限。笔者具体分析不同战斗部结构方案对复合战斗部 2 种毁伤元的影响。

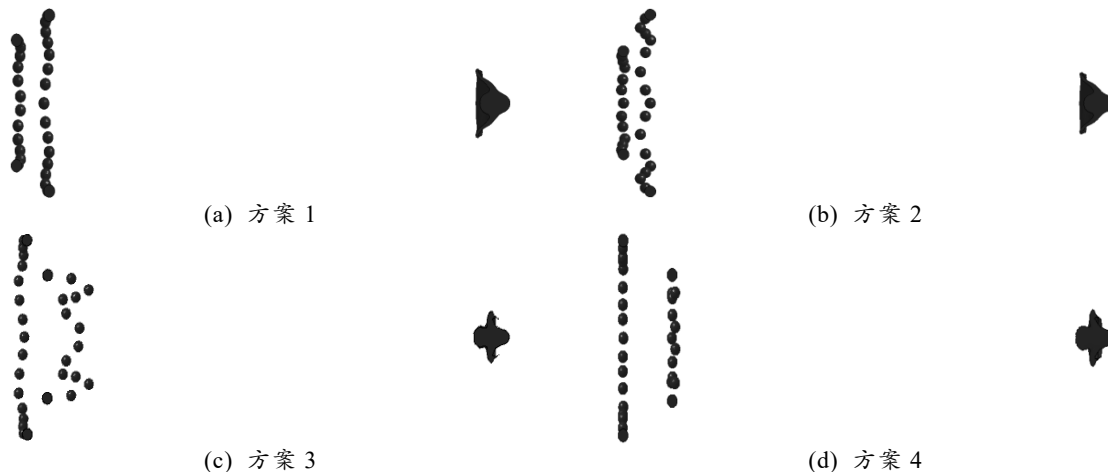


图 7 不同方案复合战斗部成型结果

#### 3.1 不同方案对复合战斗部中 EFP 成型影响

EFP 作为复合战斗部的核心毁伤元，其速度、长径比以及侵彻体长度对 EFP 成型效果和侵彻能力

有着重要影响，EFP 速度越高、长径比越大、侵彻体长度越长其侵彻效果越好。根据仿真结果得到不同方案 EFP 成型特性参数如表 5 所示。

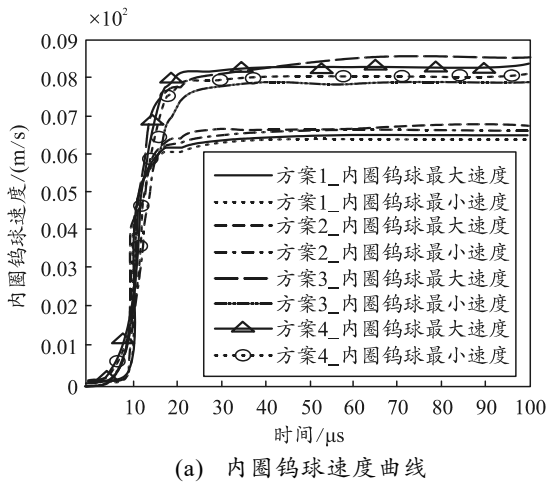
表 5 不同方案 EFP 成型参数

方案	EFP 最终成型图	速度/(m/s)	长径比	长度/mm
1		1 732	1.41	32.94
2		1 730	1.36	27.90
3		1 941	2.32	41.40
4		1 942	2.22	37.42

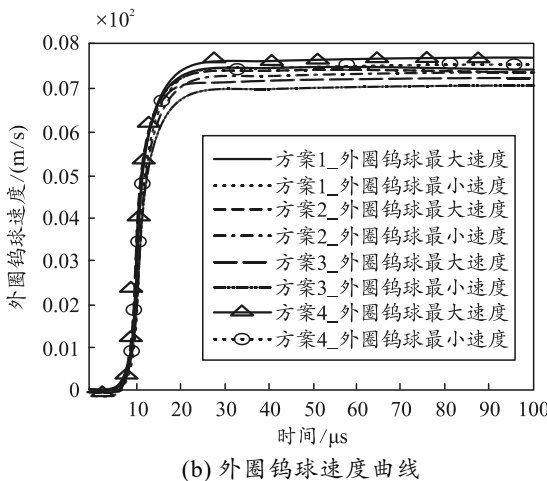
由表可知：当钨球排布方式相同时，挡环结构 2 形成的 EFP 速度均大于挡环结构 1 形成的 EFP 速度 11%左右；EFP 长径比均大于挡环结构 1 形成的 EFP 长径比 64%左右；EFP 长度大于挡环结构 1 形成的 EFP 长度 26%以上。当挡环结构相同时，钨球排布方式 1 形成的 EFP 的速度、长径比、长度均略大于钨球排布方式 2；所以挡环结构对本战斗部中的 EFP 侵彻威力影响较大，挡环内径底部与药型罩底部处于同一平面的挡环结构方案更有利于侵彻，预制破片排布方式的影响可以忽略不计。

### 3.2 不同方案对钨球速度的影响

预制球形破片对靶板的侵彻能力主要取决于钨球的动能，当钨球质量一定时，钨球速度越高，动能越大，侵彻能力越强。因此钨球轴向速度是影响复合战斗部实施毁伤能力的重要因素。对数值仿真结果分析可以得到：不同方案复合战斗部中钨球预制破片轴向速度随时间的变化曲线，如图 8 所示；钨球轴向速度云图，如图 9 所示；不同方案的钨球轴向速度计算结果如表 6 所示。



(a) 内圈钨球速度曲线



(b) 外圈钨球速度曲线

图 8 钨球轴向速度

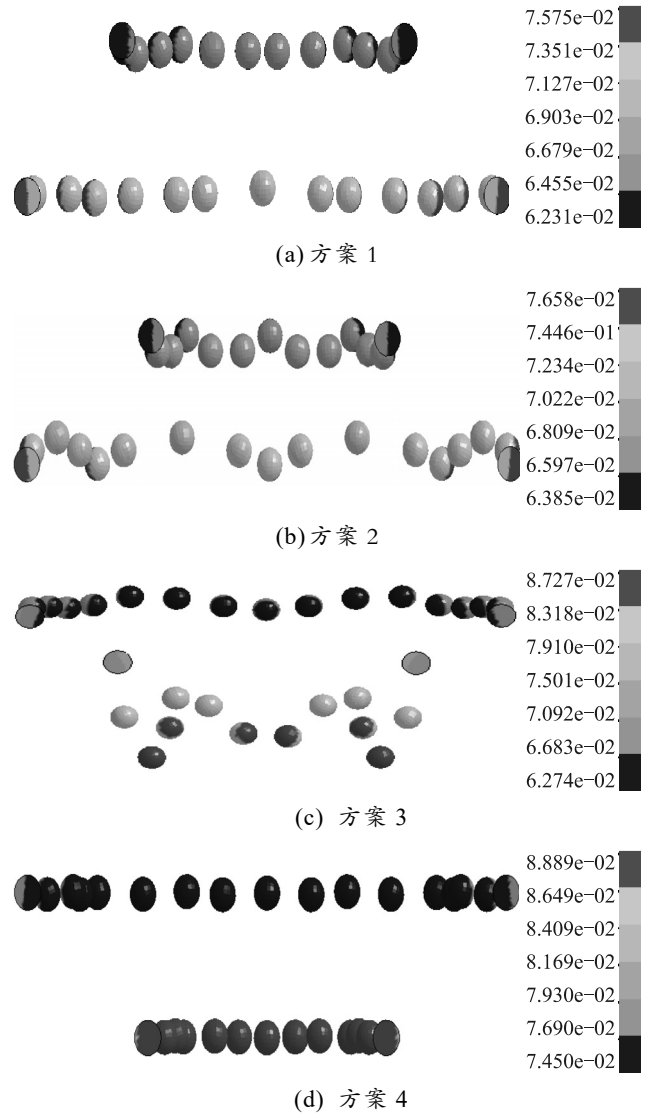


图 9 钨球轴向速度云图

表 6 复合战斗部钨球轴向速度计算统计结果 m/s

方案	$v_{1max}$	$v_{1min}$	$v_{2max}$	$v_{2min}$
1	647	637	737	730
2	671	659	747	726
3	847	756	743	739
4	830	814	744	736

表中： $v_{1max}$  为内圈钨球最大轴向速度； $v_{1min}$  为内圈钨球最小轴向速度； $v_{2max}$  为外圈钨球最大轴向速度； $v_{2min}$  为外圈钨球最小轴向速度。

由图 8、图 9 和表 6 可以看出：当钨球排布方式相同时，挡环结构 1 产生的外圈钨球轴向速度大于内圈钨球轴向速度，挡环结构 2 产生的内圈钨球轴向速度大于外圈钨球轴向速度；挡环结构 2 中内圈钨球的最大轴向速度、最小轴向速度均大于挡环结构 1 中内圈钨球的最大轴向速度。所以在钨球速度影响方面，挡环结构 2 更好。钨球的排布方式对钨球的内圈轴向速度没有影响。而外圈钨球轴向速

度基本不受结构方式、排布方式的影响，外圈钨球的轴向速度处于 730~750 m/s。

### 3.3 不同方案对钨球发散角的影响

预制破片受爆轰波的作用除获得轴向速度外，还获得径向速度。径向速度是造成破片飞散的主要原因。不同破片的排布方式，可控制破片的径向运动，进而控制破片的飞散场。钨球发散角示意图如图 10 所示。

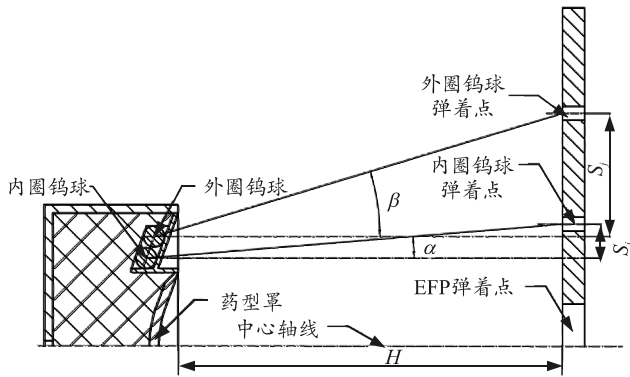


图 10 钨球发散角定义

由图可知：内圈钨球的发散角

$$\alpha = \frac{S_i}{H} \quad (1)$$

式中： $H$  为装药与靶板之间的距离； $S_i$  为钨球破片的发散半径。

$$S_i = v_{r_i} t \quad (2)$$

式中： $v_{r_i}$  为数值仿真得到的钨球径向速度； $t$  为计算结束时间。

分析数值模拟  $t=400 \mu\text{s}$  时的钨球散布情况，得到不同方案对复合战斗部钨球发散角的影响如表 7 所示。

表 7 钨球发散角统计结果 (°)

方案	成型图	$\alpha_{\max}$	$\alpha_{\min}$	$\beta_{\max}$	$\beta_{\min}$
1		2.56	2.16	7.67	6.06
2		2.32	1.81	7.44	5.97
3		3.66	2.76	7.06	6.11
4		3.31	1.95	5.77	5.25

由表可知：钨球排布方式 1 中，外圈钨球均呈规则圆形；钨球排布方式 2 中，外圈钨球则均呈现多边形。钨球排布方式 1 中的内外圈钨球最大、最小发散角均大于钨球排布方式 2 中的内外圈钨球最大、最小发散角。所以在钨球发散角影响方面，钨球排布方式 1 更好。挡环结构 2 中的内圈钨球最大、最小发散角均明显大于挡环结构 1 中的内圈钨球最大、最小发散角；挡环结构 1 中外圈钨球最大发散角大于挡环结构 2 中外圈钨球最大发散角。

根据仿真分析可以知道：采用挡环结构 2 和钨球排布方式 1 的战斗部得到的 EFP 速度最高、长径比最大、长度最长，EFP 侵彻能力最好；得到的钨球速度更高、发散角更大，所以钨球的侵彻能力最好，最终选择该结构作为实验弹体结构。

## 4 复合毁伤元战斗部实验研究

为了进一步验证该战斗部结构方案的可行性，在数值模拟的基础上，开展了战斗部静爆实验。选择采用挡环结构 2 和钨球排布方式 1 的战斗部结构进行实验。起爆方式为主装药上端面中心单点起爆。实验时战斗部与靶板之间的距离为 5 m。实验现场弹靶布置如图 11 所示。

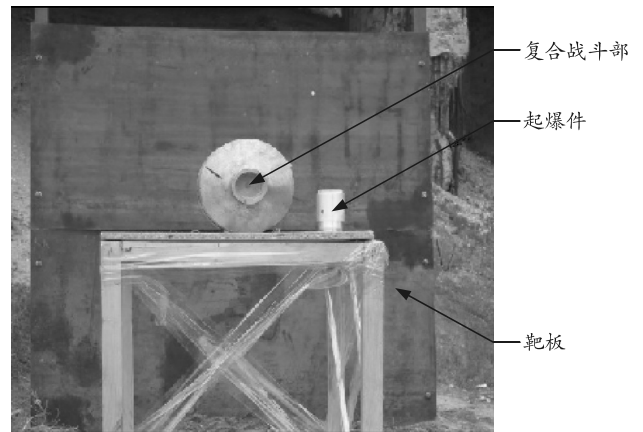


图 11 实验弹体实物

实验共进行了 2 发，对实验数据处理得到钨球落点分布如图 12 所示。由实验结果可知：形成的 EFP 侵彻孔在毁伤元中心，穿孔基本为圆形，侵彻孔直径为 32.4 mm。而破片分布于 EFP 侵彻孔周围，内圈破片分布较为零乱，但基本位于半径 100 mm 区域内；外圈破片分布基本为规则圆形，密度均匀，无明显的覆盖盲区。内圈钨球最大发散角为 3.79°，最小发散角为 1.57°；外圈钨球最大发散角为 8.41°，最小发散角为 6.10°。这些现象与数值仿真结果较为一致，战斗部毁伤效果理想。

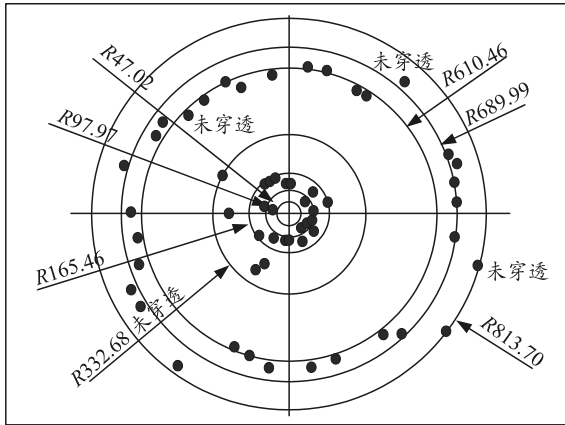


图 12 钨球落点分布

## 5 结论

笔者对不同的战斗部挡环结构和钨球排布方式的 EFP/预控破片复合毁伤元战斗部进行分析和比较, 得出以下结论:

1) 当钨球排布方式相同时, 采用挡环结构 2 的战斗部和采用挡环结构 1 的战斗部比较, 前者形成的 EFP 比后者速度高 11% 左右、长径比大 64% 左右、长度长 26% 以上; 前者产生的内圈钨球的最大轴向速度、最小轴向速度均大于后者, 两者对外圈钨球轴向速度影响不大, 外圈钨球的轴向速度处于 730~750 m/s。采用挡环结构 2 的战斗部产生的 EFP 和预制破片侵彻威力更大。

2) 当挡环结构方式相同时, 在钨球排布方式 1 中, 外圈钨球发散场均呈规则圆形; 在钨球排布方式 2 中, 外圈钨球发散场则均呈现多边形。对采用

钨球排布方式 1 的战斗部和采用钨球排布方式 2 的战斗部比较, 前者的内外圈钨球最大、最小发散角均大于后者的内外圈钨球最大、最小发散角。所以在钨球发散角影响方面, 钨球排布方式 1 更好。

综上所述: 采用挡环顶部与药型罩底部处于同一平面, 内圈钨球 26 枚、外圈钨球 32 枚钨球破片的战斗部技术方案, 能够形成具有良好侵彻能力的 EFP 且密度分布均匀的破片场。仿真与实验结果一致。

## 参考文献:

- [1] 王冬梅, 代文让, 张永涛. 信息化弹药的研究现状及发展趋势[J]. 兵工学报, 2010, 31(S2): 144-148.
- [2] 卢芳云, 李翔宇, 林玉亮. 战斗部结构与原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 27-29.
- [3] 周家胜, 任华杰. 基于射击线和粒子系统技术在定向战斗部威力仿真中的应用[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 15-19.
- [4] 徐文亮, 吴俊斌, 何春, 等. 破片杀伤型战斗部对典型雷达目标的毁伤研究[J]. 战术导弹技术, 2009(4): 26-30.
- [5] 李刚, 刘荣忠, 郭锐. 末敏弹 EFP 战斗部增强破片杀伤作用研究[J]. 战术导弹技术, 2011(2): 24-27.
- [6] 张俊, 刘荣忠, 郭锐, 等. 破甲杀伤复合战斗部仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(12): 34-37.
- [7] 龚柏林, 王可慧, 初哲, 等. EFP 战斗部破片场复合技术研究[J]. 弹道学报, 2015, 27(1): 76-79.
- [8] 王义磊, 吴越. 几种结构的圆弧杆式战斗部的数值模拟[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 77-80.
- [9] 张洋溢, 龙源, 余道强, 等. 切割网栅作用下 EFP 形成多破片的数值分析[J]. 弹道学报, 2009, 21(2): 90-94.